871
8744
82
8

MOVIMENTI DELLA SOMMITÀ RISPETTO ALLA BASE

NELLA TORRE GARISENDA DI BOLOGNA

MEMORIA

DEL

Prof. FRANCESCO CAVANI

letta alla R. Accademia delle Scienze dell' Istituto di Bologna
nella Sessione del 22 Maggio 1910

(CON TAVOLA)





PROCURA DEL RE - BOLOGNA
Pervenuto oggi 21 MAR 1911
Il Procuratore del Re

BOLOGNA
TIPOGRAFIA GAMBERINI E PARMEGGIANI

1911

MOVIMENTI DELLA SOMMITÀ RISPETTO ALLA BASE

NELLA TORRE GARISENDA DI BOLOGNA

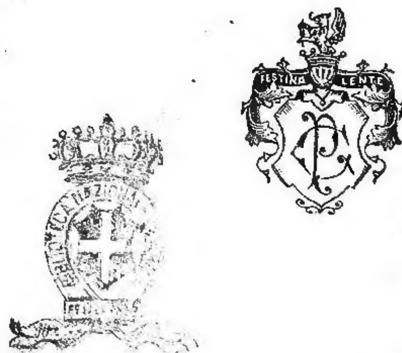
MEMORIA

DEL

Prof. FRANCESCO CAVANI

letta alla R. Accademia delle Scienze dell' Istituto di Bologna
nella Sessione del 22 Maggio 1910

(CON TAVOLA)



BOLOGNA
TIPOGRAFIA GAMBERINI E PARMEGGIANI

1911

Estratto dalla Serie VI, Tomo VII, 1909-10
delle Memorie della R. Accademia delle Scienze dell'Istituto di Bologna
Classe di Scienze Fisiche — Sezione delle Scienze Fisiche e Matematiche

Le alte fabbriche e specialmente le torri sono soggette a movimenti delle parti superiori rispetto alle loro basi, che furono più volte oggetto di studi speciali.

Il De Cesaris astronomo a Milano al principio del secolo XIX (1), il conte Moscati (2), il Bianchi (3) il Bernardi (4) e diversi altri in Italia, il D'Abbadie (5), l'Hirsch (6) il Plantamour (7) ed altri pure all'estero, studiarono tali movimenti che interessano varie scienze, fra le quali la meccanica delle costruzioni. Il prof. Vicentini dell'Università di Padova ha pure fatto ultimamente, con un pendolo registratore (8) da lui ideato, importanti osservazioni sui movimenti dell'aguglia maggiore del Duomo di Milano.

Tali movimenti dipendono specialmente dell'azione del calore solare e da quella del vento. Anche le variazioni di livello delle acque sotterranee possono produrre movimenti nelle fabbriche, ma allora si muove tutta la mole della costruzione, compresa la base, e non si determinano altrochè le differenze delle ampiezze dei movimenti stessi in alto ed in

---

(1) A. Cesaris — Sul movimento oscillatorio e periodico delle fabbriche — Appendici alle Effemeridi astronomiche di Milano per gli anni 1813 e 1816.

(2) Sopra un singolare fenomeno osservato nella specola fisico-meteorologica eretta in Milano dal sig. conte Pietro Moscati — Memorie di Matematica e di Fisica della Società Italiana delle Scienze Tomo XVII, parte II 1815.

(3) Bianchi prof. G. — Sopra i piccoli moti apparenti osservati nei muri e nelle macchine della Specola di Modena — Memorie della Società Italiana delle Scienze. Tomo XXI, 1837.

(4) Bernardi dott. Antonio — Intorno agli intimi movimenti osservati nei moti dell'Osservatorio di Modena — Giornale di Crelle. Volume XXX. Berlino 1846.

(5) D'Abbadie Antoine — Sur lest remblements de terre et sur les mouvements du sol — Comptes rendus de l'Académie des Sciences. Paris 1852.

(6) Hirsch dr. Ad. — Sur des mouvements observés dans les piliers de la lunette méridienne de Neuchâtel. Bulletin de la Société des Sciences naturelles de Neuchâtel, 1867-70 e 1877-79.

(7) Plantamour Ph. — Sur les déplacements de la bulle des niveaux à bulle d'air — Archives des Sciences physiques et naturelles — Genève 1878 e 1879-1881. — Comptes rendus de l'Académie des Sciences, Paris 1878, 1879, 1881.

(8) Vicentini prof. G. — Il pendolo registratore dei movimenti dell'Aguglia maggiore del Duomo di Milano — Memorie del R. Istituto Lombardo di scienze e lettere — Milano, Vol. XX, 1906.

basso. Bisogna poi ammettere che vi siano anche altre cause incognite, poichè vi sono certi movimenti, di ampiezza sempre molto limitata, che non si riesce a spiegare colle cause sopra indicate.

Pochi anni or sono, anche prima della caduta del Campanile di Venezia, sorsero dubbi sulle condizioni statiche di diverse torri, specialmente di quelle pendenti, e furono fatti studi speciali sulla loro stabilità e sui movimenti a cui andavano soggette, temendo che subissero spostamenti anormali e che aumentasse la loro pendenza dalla verticale.

Nel 1900 ebbi l'incarico di determinare la pendenza della Torre di Modena, detta la Ghirlandina, della quali i prof. Canevazzi e Pantanelli studiavano rispettivamente la stabilità ed i movimenti; nel 1903 fui incaricato dal Comune di Bologna di studiare la pendenza e la stabilità, nonchè i movimenti della Torre detta la Garisenda. Attendo ora ad un consimile studio sulla Torre Asinelli; altri studi del genere saranno fatti sulla Torre di Pisa, come furono già compiuti in altre Torri di Venezia e di Genova.

In altra mia pubblicazione (1) ho trattato della pendenza e delle condizioni di stabilità della Torre Garisenda, ed ora, che si stanno iniziando le osservazioni sui movimenti della Torre Asinelli, credo di qualche interesse, rendere noti i risultati ottenuti, nello studio dei movimenti della Garisenda per mezzo di 794 osservazioni fatte nel corso di tutto l'anno 1904; studio solo accennato nella precedente pubblicazione.

Prime osservazioni dei movimenti.

Che nella torre Garisenda, come in altre costruzioni consimili, si avessero movimenti prodotti dall'azione del calore solare era fuori di dubbio, ma per meglio accertare il fatto prima di pensare ad uno studio speciale dei movimenti stessi, si utilizzarono, come apparecchi d'osservazione, due fili a piombo che avevano servito al rilevamento interno della torre.

Questi due fili a piombo, essendo la torre pendente verso Est, erano attaccati alla parete Ovest, uno a Sud e l'altro a Nord, ed avevano rispettivamente la lunghezza di metri 36,18 e 35,48, poichè nel vano libero interno, alto circa 47 metri, non era stato possibile, a causa della pendenza della torre, dare ad essi una lunghezza maggiore. Trasformati in due pendoli colle masse pendolari smorzate entro vasi contenenti olio minerale lubrificante mezzo denso e con un indice che discendeva verticalmente e da ciascuno di essi sul centro di un disco orizzontale, fecero subito vedere che quello a Nord non si spostava di quantità sensibili e quello a Sud si spostava ogni giorno di quantità apprezzabili, indicando un movimento della sommità della torre rispetto alla base, diretto specialmente da Sud verso Nord; movimento che non si estendeva a tutta la torre, poichè molto presumibilmente la parete Nord rimaneva immobile, o quasi immobile.

Avuto così la prova dei movimenti della torre, e specialmente di quelli dovuti al calore solare, era indispensabile farne lo studio con un apparecchio che servisse ad osservare i movimenti stessi ed a misurarne l'ampiezza e determinarne la direzione.

---

(1) Cavani prof. F. — Pendenza, stabilità e movimenti delle Torri la Garisenda di Bologna e la Ghirlandina di Modena. — Atti del Collegio degli Ingegneri ed Architetti in Bologna. — Bologna 1903.

Condizioni della Torre Garisenda.

Fra le torri più pendenti dalla linea verticale vi è senza dubbio la Garisenda di Bologna, la quale ha il suo asse inclinato a detta linea di un angolo di

3°, 49′, 52″

che corrisponde ad uno strapiombo al piano terra di m. 3,22 sull'altezza media della Torre di m. 48,16 e quindi ad una pendenza p. % del 6,696.

Lo spigolo della Torre che ha maggiore inclinazione, sommandosi questa colla rastremazione di sezione che si ha dal basso all'alto, è quello Nord-Ovest inclinato alla verticale di un angolo di

4°, 29′, 31″

con uno strapiombo di m. 3,77 ed una pendenza del 7,827 p. %.

La torre Garisenda pende quasi del tutto verso Est e solo leggermente verso Sud, poichè il piano verticale dell'inclinazione fa un angolo di soli 10°, 34′, 41″ colle linee di base delle fronti Sud e Nord.

Le inclinazioni delle 4 fronti della torre dai piani verticali delle loro linee di base sono le seguenti:

Fronte	Ovest	4°, 11′, 31″	verso	Est
»	Est	3°, 29′, 50″	»	»
»	Nord	1°, 3′, 17″	»	Sud
»	Sud	0°, 23′, 15″	»	»

La fronte Ovest è la più pendente sommandosi in essa la rastremazione colla pendenza; quella Sud è la meno pendente poichè la rastremazione corregge in parte la pendenza.

La torre Garisenda è pure contorta di un angolo di

1°, 55′ 9″

che le linee superiori delle fronti fanno colle inferiori nel senso Nord-Est-Sud.

Il centro di pressione sulla base cade fuori del terzo medio e, tenendo conto dell'azione del vento, si ha che il materiale di cui è costruita la torre sopporta uno sforzo massimo di pressione di Kg. 24,33 per centimetro quadrato, e il sottostante terreno uno sforzo di Kg. 12.60 pure per cent. quad. La pressione che si ha sul materiale è molto rilevante, ma non tale che esso non la possa sopportare; quella sul terreno è così forte da non essere ammissibile nella costruzione di un qualsiasi edifizio.

Per queste singolari condizioni della torre Garisenda erano giustificati i dubbii sulle sue condizioni di stabilità ed era ovvio fare uno studio sui movimenti a cui la torre stessa poteva andare soggetta; studio che ha pienamente dimostrato come non vi siano in essa movimenti anormali per le attuali ottime condizioni del terreno sottostante che bisogna siano sempre così conservate; e come i movimenti dovuti alle azioni del calore solare e del vento siano conformi a quelli degli altri edifizi consimili e nei limiti che si possono ritenere ammissibili, senza alcuna apprensione per la solidità della Torre.

Apparecchio d'osservazione.

La scelta di un apparecchio d'osservazione dei movimenti della Garisenda, presentava difficoltà di diverse specie, sia per le condizioni locali, sia per la deficienza di mezzi finanziarii disponibili e di personale adatto alle osservazioni.

Bisognava scegliere un apparecchio semplice, posto alla base della torre e che non presentasse difficoltà di impianto, di manutenzione e di osservazione.

Pensai di fare uso di un pendolo, colla sua massa pesante opportunamente immersa in un liquido regolatore, e di osservare e misurarne i movimenti, secondo due direzioni fra di loro perpendicolari, col mezzo di due piccoli cannocchiali posti sulla base della torre, isolati dalle pareti e colle loro linee di collimazione nelle due direzioni suddette.

Tali direzioni furono scelte in modo da riuscire parallele a quelle dei lati del quadrato di base della torre e così approssimativamente sulle linee Nord-Sud ed Est-Ovest poichè la base della Garisenda è quasi orientata a pieno Nord avendo i suoi lati di Est e di Ovest che fanno colla direzione del meridiano un angolo di pochi gradi, partendo dal Nord verso l'Est.

A causa della enorme pendenza della Garisenda non era possibile attaccare il filo del pendolo in vicinanza alla sommità del suo vano interno, anche contro la parete Ovest poichè esso andava ad incontrare la parete Est prima di arrivare alla base della Torre.

In tale vano disponibile interno, per ottenere che la massa pendolare arrivasse al piano della base e ad una conveniente distanza dalla parete Est, non si potè collocare altro che un pendolo della lunghezza di circa 38 metri, col suo punto d'attacco contro la parete Ovest, fissato così a circa 10 metri al disotto della sommità della torre.

Per stabilire superiormente il punto d'attacco del filo e fare in modo che sul pendolo si potessero risentire gli effetti dei movimenti della parete Sud, si dispose a quell'altezza in direzione trasversale nell'angolo Sud-Ovest, una lastra di granito della grossezza di m. 0,15 solidamente incastrata e murata nelle pareti Sud ed Ovest della Torre.

Sopra tale lastra si mise, fermandolo con viti, un piccolo arganello su cui era fissata l'estremità superiore del filo, il quale per pochi giri si avvolgeva sull'arganello stesso, e poscia discendeva attraverso ad un piccolo foro praticato in detta lastra.

Questo foro, di diametro superiore al diametro del filo di quella minima quantità necessaria perchè il filo potesse passare attraverso ad esso, serviva a stabilire il punto invariabile di sospensione del pendolo e l'arganello mosso da un piccolo rocchetto dentato, per mezzo di una vite perpetua, serviva a regolare la lunghezza del filo del pendolo stesso.

Al filo di ferro omogeneo zincato della grossezza di mm. 1,4 che si presta molto meglio del filo d'acciaio, era attaccata alla estremità inferiore una massa pendolare di ghisa, a forma di cilindro scannellato, del peso di Kg. 11,500, che si immergeva in un vaso contenente olio minerale lubrificante mezzo denso non soggetto al gelo e poco variabile di densità al variare della temperatura.

La forma della massa pendolare e di tutto l'apparecchio d'osservazione, messo alla base della torre, apparisce dalla fig. 1. della annessa tavola.

Non essendo possibile fare osservazioni collimando ad un filo così grosso come quello del pendolo, si interruppe il filo stesso all'altezza dei piccoli cannocchiali d'osservazione con un telaio di forma rettangolare, entro il quale, sulla sua mediana verticale, fu fissato convenientemente un filo di platino della grossezza di mm. 0,05 da servire per le collimazioni al pendolo.

Il filo del pendolo discendeva alla base della Torre verso l'angolo Sud-Est e ad una distanza dalle due pareti interne Est e Sud appena sufficiente per dare posto alla massa pesante del pendolo ed al vaso contenente il liquido destinato a smorzarne le oscillazioni

In vicinanza di tali pareti e ad una piccola distanza da esse, dalle parti opposte rispetto al pendolo, si costruirono due pilastrini in muratura destinati a servire di sostegno ai due piccoli cannocchiali di osservazione.

Questi cannocchialetti, costruiti egregiamente dalla officina Salmoiraghi di Milano sul tipo dei plesiotelescopi del Iadanza, hanno una identica composizione. L'obbiettivo è un sistema composto di due lenti a distanza entrambe convergenti ed acromatiche: la prima di tali lenti rivolta agli oggetti esterni ha una distanza focale di mm. 240 e l'altra una consimile distanza di mm. 40. Esse sono disposte in modo che il fuoco interno della prima lente cada nel centro della seconda e quindi la distanza loro sia di circa mm. 240, ossia quasi eguale alla distanza focale della prima lente.

Fra l'obbiettivo e l'oculare, nella posizione del micrometro, vi è una lastrina di vetro graduata con 100 divisioni numerate di 10 in 10, e messa in modo che la divisione n. 5 corrisponde alla posizione della linea di collimazione del piccolo cannocchiale. Il micrometro graduato dista di mm. 30 dalla seconda lente dell'obbiettivo e l'allungamento massimo per l'adattamento alla distanza è pure di mm. 30. A cannocchiale tutto allungato si ha la visione distinta di un oggetto posto contro la lente esterna obbiettiva ed a cannocchiale tutto accorciato si ha la visione distinta di un oggetto a distanza di circa 90 centimetri dall'obbiettivo. Questi limiti sono più che sufficienti per lo scopo a cui questi cannocchialetti dovevano servire ed a cui hanno ottimamente servito.

La distanza del vertice esterno dell'obbiettivo di ciascun cannocchiale dal filo del pendolo, fu fissata in mm. 330 e a tale distanza le divisioni dei micrometri hanno il valore di mezzo millimetro ciascuno, cosichè potendo stimare convenientemente il decimo della divisione si misurarono gli spostamenti del filo a piombo al ventesimo di millimetro.

I due cannocchialetti furono disposti sopra appositi supporti sostenuti da una parte da una vite calante in modo da poter mettere le linee di collimazione in direzioni orizzontali ed alla stessa altezza, e muniti pure di una vite per spostamenti laterali, così da poter ottenere di dirigere le dette linee sensibilmente allo stesso punto del filo del pendolo nella posizione iniziale dell'apparecchio.

La distanza verticale fra il punto di sospensione del filo del pendolo e il piano orizzontale delle linee di collimazione dei cannocchialetti risultò di m. 37,30 (1).

---

(1) *Nota.* Tutto l'impianto fu fatto molto lodevolmente dal cav. Silvio Minghetti meccanico della R. Scuola d'Applicazione per gli Ingegneri di Bologna.

Coll' apparecchio così ideato si determinarono i moti della torre che producevano un effetto permanente entro determinati limiti e non i movimenti accidentali e di breve durata prodotti da cause momentanee.

Procedimento delle osservazioni.

Nei mesi da gennaio a tutto luglio si fecero tre osservazioni giornaliere alle 8 del mattino, a mezzogiorno e alle 18 della sera. Anche nel mese di agosto si continuò collo stesso sistema, ma, per impedimenti dell'incaricato delle osservazioni, furono queste diverse volte interrotte. Nei mesi successivi da settembre a tutto dicembre, fu fatta una sola osservazione giornaliera all'ora del mezzogiorno.

L'incaricato delle osservazioni si accertava primieramente delle condizioni regolari di tutto l'apparecchio d'osservazione e del pendolo, e poscia della perfetta immobilità di questo; indi procedeva alle letture dei micrometri dei due cannocchialetti, ripetendole diverse volte, ad intervalli, per ben accertarsi della loro esattezza e della immobilità del pendolo. Osservava in seguito e registrava in uno speciale prospetto la temperatura interna della torre e l'esterna al sole, lo stato dell'atmosfera, le condizioni del vento e quelle delle quattro fronti della torre rispetto al sole, annotando per ciascuna di esse se era soleggiata in tutto o in parte.

Le osservazioni di maggiore importanza erano naturalmente quelle relative alla lettura dei micrometri che si facevano in numeri di tre cifre, la prima delle quali era data dai numeri della scala micrometrica, la seconda dalle divisioni intere della scala stessa, e la terza dalle frazioni di queste divisioni espresse in decimi. Per trasformare poi i numeri così letti sui micrometri, in altri espressi in unità di millimetro, bastava dividerli per 20.

Movimenti diurni in 24 ore.

Gli spostamenti diurni del pendolo nei primi 4 mesi dell'anno 1904, furono sempre molto piccoli e spesso quasi insensibili.

In gennaio lo spostamento maggiore nelle 24 ore, dalle 8 del mattino alle 8 del giorno successivo, si ebbe il 28 in giornata calma in cui il sole batteva per metà la fronte Sud e quasi per intero quella Est. Lo spostamento ebbe la direzione da Sud-Est a Nord-Ovest, con una ampiezza di mm. 0,9 corrispondente ad un angolo di deviazione di appena 5 a 6 secondi, considerandone il vertice all'altezza delle linee di collimazione dei piccoli cannocchiali. In febbraio si ebbero spostamenti diurni tutti inferiori a quello del 28 gennaio.

In marzo si ebbe lo spostamento diurno di maggiore ampiezza il 21 in giornata bella e calma col sole che a mezzo giorno batteva per metà la fronte Sud e per intero quella Est. La torre si mosse in tal giorno dalle 8 del mattino alle 12 in direzione da S E a N O e poi dalle 12 alle 18 da Ovest ad Est tornando da Est verso Ovest nella notte successiva come apparisce dal diagramma del movimento di tale giorno rappresentato fra le fig. n. 2 dell'unita tavola.

L'ampiezza massima dello spostamento in direzione Est-Ovest fu di mm. 1,3 corrispondente ad un angolo di deviazione di 7 ad 8 secondi e quindi tale da potersi dire esso pure quasi insensibile.

In aprile gli spostamenti diurni furono tutti inferiori a quelli del giorno 21 marzo

Nei quattro mesi ora considerati si ebbero solo 10 diagrammi chiusi nelle 24 ore e n. 8 giorni in cui il pendolo restò fermo.

I diagrammi si chiusero in periodi di tempo più lunghi.

In generale nelle 24 ore il pendolo segnava un movimento nella Torre da Est ad Ovest sino alle ore 12, poi dalle 12 alle 18 il moto cambiava direzione andando quasi sempre da Sud a Nord e solo qualche volta in senso inverso. Nella notte successiva la Torre tornava da Ovest verso Est, senza però chiudere in generale il ciclo di questo movimento, come apparisce da diversi diagrammi dei detti 4 mesi rappresentati nelle fig. 2.

I moti diurni, come si è già detto, furono sempre molto piccoli in questi 4 mesi. I movimenti minori si ebbero con regola costante nei giorni in cui il sole non era scoperto; i maggiori nei giorni in cui la Torre era battuta dal sole nelle pareti Est e Sud.

Nel mese di gennaio sino a tutto il giorno 26, si ebbero movimenti piccolissimi perchè il sole rimase quasi sempre coperto; si ebbero movimenti più forti dal 27 al 30 poichè la Torre fu battuta dal sole. Così pure successe negli altri mesi e in quello di aprile dal 13 al 29 si ebbe quasi sempre nuvolo e pioggia e i moti diurni della Torre furono costantemente piccolissimi; il 30 la Torre fu battuta dal sole e si ebbe subito uno spostamento maggiore, come apparisce dal relativo diagramma rappresentato fra le fig.e 2.

Non è possibile ora stabilire la causa degli spostamenti del pendolo, e quindi della Torre, nei giorni di sole coperto e senza vento, specialmente quando tali giorni si susseguono numerosi, mentre ben chiara è apparsa nei giorni sereni l'azione prodotta dal calore solare.

Nei 4 mesi sin qui considerati non si ebbero venti forti e nessun movimento fu constatato nella Torre che potesse ritenersi prodotto dall'azione del vento.

In alcuni giorni poi si ebbero degli spostamenti del tutto irregolari, come si vede in diversi fra i diagrammi delle fig.e 2 e non si sa come spiegarli.

Nei mesi di maggio e giugno si verificarono movimenti sempre molto piccoli in condizioni normali, ma con un maggior numero di chiusúre di diagrammi nelle 24 ore. Si ebbe pure un periodo di movimenti sensibili prodotti dall'azione del vento, dal 22 al 25 maggio.

Dal I al 20 maggio i moti della Torre furono dello stesso ordine di grandezza di quelli verificati nei quattro mesi precedenti nei giorni di sole coperto, salvo poche eccezioni come ad esempio nel giorno 16 maggio in cui si ebbero oscillazioni un po' maggiori che si vedono nel diagramma compreso fra le fig.e 2.

Ma in tutto questo periodo la Torre fu quasi sempre battuta dal sole nelle diverse sue fronti ed anche in quella Nord sebbene per poco tempo.

Ciò induce a ritenere che vi sia una compensazione fra i movimenti prodotti dalla azione del calore solare quando tutta la Torre è successivamente soleggiata, in modo da diminuirne i risultati complessivi.

In questo periodo di tempo il vento si fece sentire anche con velocità abbastanza forte di 20 a 25 chilometri all' ora, ma il pendolo non manifestò movimenti speciali nella Torre, così da dover concludere che i venti normali non riescono a smovere quel grande monolite che si può ritenere costituito dalla Torre Garisenda.

Soltanto nel giorno 22 maggio incominciò a manifestarsi un vento abbastanza forte che nel mattino del giorno 23, come risulta da informazioni gentilmente favorite dall'Osservatorio della R. Università, raggiunse fra le ore 6 e le 8 la velocità massima di 42 chilometri all'ora provenendo dal SO e quindi in direzione prossima a quella della pendenza della Torre. Questa si risentì dell'azione di un tal vento, tanto nel giorno 23 come nei successivi 24 e 25, tornando solo il 26 ai suoi spostamenti diurni normali.

Il diagramma degli spostamenti di questi giorni insieme riuniti, con numerazione progressiva a partire dalla osservazione delle ore 8 del primo giorno, è compreso fra le fig.e 2 e dimostra come la Garisenda si sia piegata verso Est con uno spostamento massimo di mm. 4 corrispondente ad un angolo di deviazione di 22 secondi, rialzandosi poi da ultimo verso Ovest.

Dal 26 maggio al 23 giugno si ebbero i soliti movimenti molto piccoli; solo eccezionalmente il 1° giugno in giorno calmo e col sole sulle fronti Est e Sud, lo spostamento salì ad 1 mm. rialzandosi la Torre da Est ad Ovest. Dal 24 al 30 giugno si ebbero movimenti consimili ai precedenti e solo un po' maggiori, col massimo nel giorno 25 di mm. 1,5 essendo la Torre battuta successivamente dal sole nelle sue quattro fronti.

In questi due mesi si ebbero 10 diagrammi chiusi nelle 24 ore e n.° 5 giornate in ognuna delle quali le osservazioni fatte alle ore 12 e 18 coincidevano con quelle delle ore 8.

Anche in questi due mesi si manifestò varie volte la regola del movimento diurno da Est ad Ovest, poi a Nord per tornare verso Est nella notte successiva, ma più spesso gli spostamenti non seguirono una regola determinata, manifestandosi con direzioni qualsiansi e solo colla prevalenza di quella al Nord.

Nel mese di luglio, ed anche in quello di agosto nei pochi giorni di osservazioni complete fatte in esso, si manifestò una singolare regolarità nei movimenti del pendolo e quindi nei diagrammi corrispondenti, come si vede in quelli riportati nelle fige. 2, eccetto che nei giorni dal 29 luglio al 2 agosto

Gli spostamenti massimi giornalieri furono quasi sempre da Est ad Ovest nel mattino, da Ovest ad Est nel pomeriggio o nella notte successiva con valori oscillanti sul millimetro.

La Torre fu battuta quasi sempre nello stesso modo dal sole con calori maggiori di quelli dei mesi precedenti. I venti sempre leggeri come risulta dai registri delle osservazioni diurne ed anche delle osservazioni (1) meteorologiche dell' Osservatorio della Regia Università. I diagrammi degli spostamenti quasi sempre chiusi nelle 24 ore. Nessun giorno in cui il pendolo non si sia mosso.

---

(1) M. Rajna. — Osservazioni meteorologiche dell' annata 1904. — Memorie della R. Accademia delle Scienze dell'Istituto di Bologna. — Bologna 1905.

La Torre al mattino si muoveva da Est verso Nord-Ovest, nel pomeriggio tornava da Ovest ad Est inclinando verso Sud e nella notte successiva si spostava in modo da chiudere il diagramma.

Nei giorni dal 28 luglio al 1° agosto si ebbero movimenti irregolari molto più forti senza altre cause apparenti che possano servire a spiegarli. Il diagramma d'insieme del movimento di tali giorni è rappresentato fra le fig.^e^ 2.

Il massimo spostamento risultò di 3 mm. e quindi inferiore a quello verificatosi nei giorni 23 e 24 maggio in causa di un vento molto forte.

Anche in questi giorni, meno che nel 28 luglio e 1° agosto, si ebbero i diagrammi chiusi nelle 24 ore.

Nelle osservazioni di tutti i giorni dei mesi dal gennaio all'agosto non si riconobbe alcun fatto specifico da potersi attribuire alla differenza di temperatura fra l'interno e l'esterno della torre. Solo nei mesi di luglio e di agosto il maggior calore solare produsse movimenti maggiori.

Nei mesi successivi all'agosto non fu possibile fare altro che l'osservazione del mezzogiorno e quindi si terminò lo studio dei movimenti diurni della torre, che si era però prolungato abbastanza nel corso di quasi 7 mesi, così da poterne dedurre delle conclusioni sufficientemente attendibili.

I movimenti della Garisenda prodotti dall'azione del sole sono in qualche modo influenzati da diversi alti fabbricati che la circondano e specialmente dalla torre Asinelli posta a Sud di essa e molto più alta. Ciò può servire forse a spiegare alcune delle anomalie che si riscontrano nei diagrammi degli spostamenti, specialmente diurni, e nelle epoche di temperature non molto alte.

Movimenti periodici in tempi diversi.

Nello studio degli spostamenti diurni si è visto che da gennaio ad aprile raramente si chiudevano i diagrammi nelle 24 ore; in maggio e giugno se ne chiudeva un numero maggiore e nei mesi di luglio e di agosto, quasi tutti i diagrammi dei movimenti diurni si chiudevano nelle 24 ore. Da ciò si può dedurre che il calore solare quando è più intenso produce nella torre movimenti più sensibili, ma più regolari.

Le chiusure dei diagrammi avvenivano però in numero rilevante anche nei primi sei mesi dell'anno, ma in periodi vari e superiori alle 24 ore.

Determinando queste chiusure in diversi periodi si può compilare lo specchio seguente, nel quale è indicato il numero dei diagrammi chiusi in ogni mese, in periodi più o meno lunghi, ma tutti superiori alle 24 ore, e il numero di quelli chiusi da un mese ad un altro

		Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
Con 3 osservazioni giornaliere	Gennaio . .	26	14	2	1	—	—	—	—	—	—	—	1
	Febbraio .	—	28	21	6	2	—	—	—	—	—	—	—
	Marzo	—	—	32	14	—	1	2	—	—	—	—	—
	Aprile	—	—	—	17	10	4	—	—	—	—	3	1
	Maggio . . .	—	—	—	—	14	5	1	3	2	1	—	2
	Giugno . . .	—	—	—	—	—	29	9	4	—	—	—	—
	Luglio. . .	—	—	—	—	—	—	17	5	4	—	—	—
Con 1 osserv. giornaliera	Agosto . . .	—	—	—	—	—	—	—	4	4	1	—	—
	Settembre	—	—	—	—	—	—	—	—	3	1	—	—
	Ottobre . . .	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4	1
	Novembre	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4
	Dicembre .	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2

In questo specchio si vede che dopo il mese di luglio il numero dei diagrammi chiusi è molto ridotto, ma ciò succede per il fatto che le osservazioni, interrotte per un po' di tempo nel mese di agosto, furono successivamente riprese, limitandole però ad una sola per ogni giorno, alle ore 12, come già si è detto.

Lo specchio dei diagrammi chiusi fa vedere chiaramente come la torre Garisenda non subisca movimenti anormali e come la sua pendenza non aumenti. Essa si muove ritornando sempre, dopo un tempo più o meno lungo, alla sua posizione primitiva e non è quindi giustificato alcun dubbio sulla sua stabilità per i movimenti a cui va soggetta in via normale.

Inoltre gli spostamenti massimi a cui essa è andata soggetta nel 1904, tanto per l'azione del sole come per quella del vento, sono di un tale ordine di grandezza da non fare dubitare menomamente della sua stabilità e rigidità.

La Garisenda si è trovata il 18 gennaio nel punto più a Sud e il 29 luglio in quello più a Nord, con uno spostamento massimo di mm 4,25 nel senso Nord-Sud, corrispondente ad una oscillazione di 24″. Essa si è trovata nel punto più ad Est il 24 maggio, a causa di forti colpi di vento, e nel punto più ad Ovest il 27 dicembre con uno spostamento massimo nel senso Est-Ovest di mm. 6.95 corrispondenti ad una oscillazione di 39″.

Siccome poi il movimento più temibile nella Garisenda è quello da Ovest ad Est perchè nel senso della forte sua pendenza, così si può osservare che essa si è mossa dal 1° gennaio al 24 maggio con moltissime piccole oscillazioni da Ovest verso Est di mm. 4,5

e dopo dal 24 maggio al 27 dicembre, pure con molteplici oscillazioni consimili, da Est ad Ovest di mm. 8,95, cosicchè essa nel suo movimento complessivo risultante, si è mossa in senso contrario alla sua pendenza, ossia si è raddrizzata con uno spostamento del pendolo di mm. 2,45 corrispondente ad una oscillazione angolare di 14 secondi.

Movimento annuo.

Uno studio del movimento annuo della Garisenda nel 1904, non può farsi che sopra una sola osservazione giornaliera, su quella cioè del mezzogiorno, che fu compiuta in tutto il corso dell'anno con una sola breve interruzione in alcuni giorni del mese di agosto.

Le fig.e 3 rappresentano i diagrammi del movimento annuo della torre, rispettivamente nelle due direzioni Nord-Sud ed Est-Ovest.

I diagrammi sono riferiti alla posizione del pendolo al 1° gennaio 1904, e i due assi di riferimento passano appunto per una tale posizione e sono paralleli ai lati del rettangolo di base della torre, corrispondendo approssimativamente alle direzioni Est-Ovest e Nord-Sud.

Dall'esame dei due diagrammi si deducono facilmente le seguenti osservazioni:

Per il movimento nel senso Nord Sud si vede che la torre nella stagione invernale si scostava di poco dalla posizione iniziale del 1° gennaio, oscillando ora da una parte, ora dall'altra di tale posizione, con prevalenza però ben marcata di una deviazione a Nord prodotta dal calore solare. La prevalenza di tale deviazione cresce sino alla fine di aprile in cui la torre ritorna per alcuni giorni alla posizione iniziale. Dopo, aumentando sempre l'azione del calore solare, la torre devia sempre più verso Nord sino all'agosto e torna dopo ad oscillare verso Sud avvicinandosi, e, si può anche dire, raggiungendo la posizione del 1° gennaio verso la fine di dicembre

Questo diagramma fa vedere chiaramente quale sia stata l'azione del sole nella direzione Nord-Sud e dimostra anche la regolarità dell'azione stessa.

Vi sono alcune anomalie, sempre però nei limiti tollerabili, manifestatesi nel maggio, nel luglio e alla fine di dicembre. Lo spostamento del mese di maggio fu prodotto dalla azione di un vento fortissimo, come già si è visto nello studio dei movimenti diurni. Per gli spostamenti di luglio e di dicembre, dalle osservazioni fatte non si possono dedurre le cause che li hanno prodotti. Il cielo sereno in quei giorni del mese di luglio in cui avvennero i maggiori spostamenti e un po' variabile con prevalenza del sereno negli ultimi giorni del dicembre; il vento leggerissimo in luglio e quasi nullo nel dicembre; le temperature quasi costanti, con differenze inferiori ai 2 gradi nell'uno e nell'altro periodo, non danno la ragione di quei movimenti, che se non si possono spiegare, si possono però ritenere non temibili, perchè sempre dello stesso ordine di grandezza degli altri movimenti normali maggiori.

Dall'altro diagramma si vede che la torre sino ai primi di maggio ha oscillato attorno alla posizione iniziale del 1° gennaio, con leggera prevalenza delle oscillazioni ad Est.

Dopo, e sin verso la fine di agosto, ha il predominio lo spostamento ad Est, ma in misura molto limitata e sensibilmente inferiore a quella degli spostamenti verso Nord verificati nello stesso periodo di tempo. Nel settembre le oscillazioni tendono ad avvicinarsi alla posizione del 1° gennaio e nell'ottobre passano dall'altra parte dell'asse di riferimento corrispondente a detta posizione iniziale e si mantengono sino alla fine di dicembre, caratterizzando una oscillazione continua predominante da Est verso Ovest in senso contrario a quello della pendenza della torre. In diversi giorni dei mesi di novembre e di dicembre la torre torna, rispetto al movimento ora considerato, nella posizione che occupava al 1° gennaio.

Da questo diagramma apparisce lo spostamento relativamente forte avuto in maggio e prodotto dal vento; non apparisce quello della fine di luglio che fu limitato alla direzione Nord-Sud; apparisce l'altro della fine di dicembre che non si può spiegare, ma che indica un raddrizzamento della torre da Est ad Ovest che, se potesse avere influenza, sarebbe favorevole alla stabilità della torre stessa

Su questo movimento in direzione Est-Ovest non può a meno di non avere influenza il punto di sospensione del pendolo situato in vicinanza alla parete Ovest e sopra una traversa congiunta alle pareti Ovest e Sud. La parete Est distante da tale punto di sospensione e senza essere direttamente unita al punto stesso, non poteva far sentire completamente l'azione del suo movimento. Si spiega il predominio delle oscillazioni ad Est in diversi mesi, mentre la parete Est è più battuta dal sole di quella Ovest, specialmente nei primi mesi dell'anno. Il movimento prodotto dal sole nella parete Est è favorevole alle condizioni di stabilità della torre, perchè in direzione contraria alla pendenza, e quindi la minore ampiezza delle oscillazioni indicate da questo diagramma, non può nuocere alle conclusioni favorevoli alla stabilità stessa.

Lo studio del movimento annuale della torre ha dimostrato pienamente come non aumenti la sua pendenza e come non variino le sue condizioni di stabilità, poichè tutti i movimenti nel corso dell'anno non potevano avere influenza sulle condizioni stesse. Si può ancora osservare che oltre ai cicli chiusi nelle 24 ore, oltre a quelli più numerosi chiusi in periodi diversi, si ha pure un ciclo di movimento chiuso dal 7 gennaio al 14 dicembre, od anche dal 1° gennaio, non essendovi che una differenza di appena mm. 0,2 nella direzione Nord-Sud dalla posizione iniziale che la Garisenda aveva il 1° gennaio di quell'anno a quella del 14 dicembre. Così si può dire che dopo il movimento annuale la torre è tornata alla posizione primitiva.

Conclusioni.

Da tutto lo studio fatto si possono dedurre le seguenti conclusioni:

1. La torre si muove nella parte alta rispetto alla base per l'azione del calore solare.

2. La torre si muove similmente per l'azione di venti molto forti; non si muove per i venti di intensità ordinaria.

3. La torre si muove quasi continuamente; nella stagione estiva non vi sono giorni in cui si possa dire che rimane ferma; ve ne sono in poco numero nelle altre stagioni.

4. Per l'azione del sole la torre si sposta verso Nord ed oscilla fra Est ed Ovest.

5. Per l'azione di un forte vento si hanno movimenti irregolari e la torre non ritorna nelle sue condizioni normali altro che dopo un certo periodo di tempo più o meno lungo.

6. La torre ha piccoli spostamenti nelle giornate con sole coperto ed anche in una lunga serie di tali giornate susseguentesi le une alle altre; ha pure piccoli spostamenti nelle giornate completamente serene quando tutte le sue faccie sono successivamente battute dal sole, ma con temperatura non molto alta.

7. I movimenti della torre sono più sensibili quando essa è battuta soltanto in parte dal sole anche con temperatura non molto alta come nella stagione invernale; sono più sensibili ancora quando tutte le faccie sono successivamente battute dal sole con alte temperature, come nella stagione estiva.

8. I movimenti della torre prodotti dal sole sono più regolari nella stagione estiva che nelle altre stagioni e specialmente in quella invernale.

9. Nell' estate quasi tutti i diagrammi si chiudono nelle 24 ore; nelle altre stagioni tali chiusure avvengono in numero minore e raramente nella stagione invernale. Vi sono però sempre numerose chiusure di diagrammi in periodi più lunghi; se ne hanno pure alcune che si possono dire annuali.

10. I diagrammi del movimento chiusi in 24 ore nella stagione estiva hanno forme abbastanza regolari e ripetute. I diagrammi chiusi nelle altre stagioni e in periodi più lunghi hanno forme del tutto irregolari.

11. Il movimento diurno della torre indica in generale uno spostamento da Est ad Ovest nel mattino con deviazione verso Sud ed un ritorno ad Est nel pomeriggio o nella notte successiva. Alle volte si verificano spostamenti irregolari, dei quali non si possono stabilire le cause.

12. Gli spostamenti della Garisenda sono sempre di ampiezza molto limitata e tali da non poter nuocere alla sua stabilità; per l'azione del sole lo spostamento massimo risultò di mm. 1,5 corrispondente ad una oscillazione di 9 secondi; per l'azione del vento di di mm. 4, coll'oscillazione di 22 secondi. Lo spostamento massimo complessivo nel corso dell'anno fu di mm. 6,95 corrispondente ad una oscillazione di 39 secondi.

251994

Movimenti nella Torre Garisenda di Bologna, osservati nell'anno 1904.

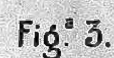
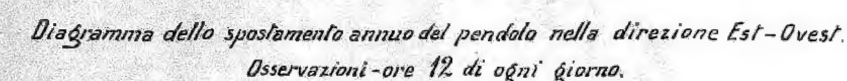
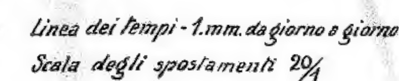


Fig.a 3.

E S T





Asse riferimento Nord-Sud passante per posizione iniziale del pendolo 1.° gennaio.

Dicembre · Novembre · Ottobre · Settembre · Agosto · Luglio · Giugno · Maggio · Aprile · Marzo · Febbraio · Gennaio





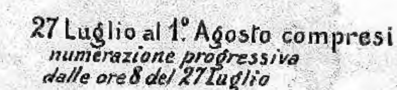




3 Gennaio · 21 Gennaio · 27 Gennaio · 28 Gennaio · 8 Febbraio · 9 Febbraio · 13 Febbraio · 18 Febbraio · 20 Febbraio · 22 Febbraio · 25 Febbraio · 27 Febbraio

11 Marzo · 14 Marzo · 16 Marzo · 18 Marzo · 21 Marzo · 23 Marzo · 30 Marzo · 1 Aprile · 7 Aprile · 11 Aprile · 12 Aprile · 30 Aprile

16 Maggio · 21 al 25 Maggio (numerazione progressiva dalle ore 8 del 21 Maggio) · 1 Luglio · 2 Luglio · 4 Luglio · 7 Luglio · 10 Luglio



20 Maggio · 12 Luglio · 18 Luglio · 19 Luglio · 21 Luglio · 25 Luglio

11 Giugno · 25 Giugno · 2 Agosto · 4 Agosto · 6 Agosto

23 Giugno · 27 Giugno

3 Agosto · 5 Agosto · 29 Agosto

24 Giugno · 29 Giugno

N O R D

S U D

O V E S T

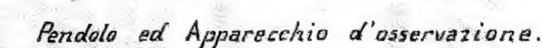
31 Dicembre · Dicembre · Novembre · Ottobre · Settembre · Agosto · interruzione osser. · 27 Luglio · Luglio · Giugno · 21 Maggio · Maggio · Aprile · Marzo · Febbraio · Gennaio · 1.° Gennaio

Asse riferimento Est-Ovest passante per posizione iniziale del pendolo 1.° Gennaio

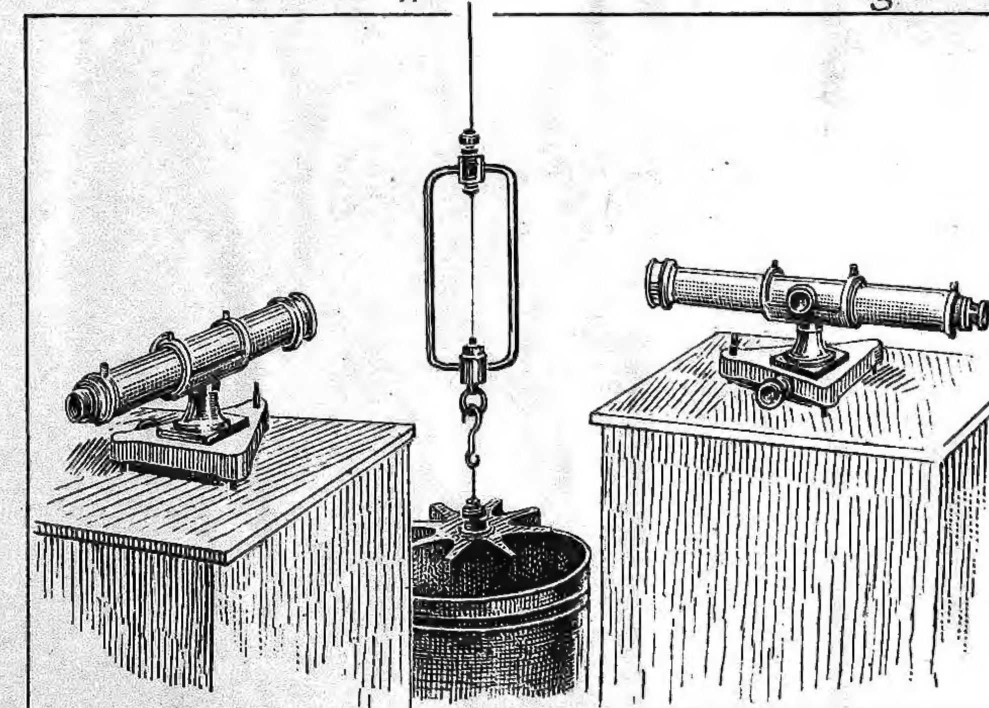
Diagramma dello spostamento annuo del pendolo nella direzione Nord-Sud.

Osservazioni - ore 12 di ogni giorno.

Linea dei tempi - 1 mm. da giorno a giorno
Scala degli spostamenti 20/1







Lit. Sauer & Barigazzi - Bologna.

1251994 P